

## STUDIUM PEVNOSTNÍCH A PLASTICKÝCH VLASTNOSTÍ SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN HLINÍKU PŘI VYSOKÝCH TEPLOTÁCH

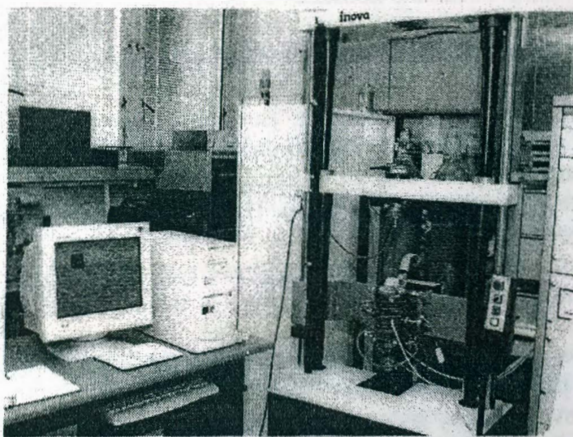
R. KOŘENÝ<sup>1</sup>, P. LICHÝ<sup>2</sup>

**ABSTRACT:** The measurement of strength and plastic properties of metal materials at normal, elevated and high temperatures. Temperature dependence of the tensile strength, elongation, contraction (plasticity) and fracture work of the alloys AISi10MgMn and AISi7Mg0,3. Fractografical evaluation of the fracture surfaces. The presupposed mechanism of the initiation and diffusion of the fracture at normal, elevated and high temperatures.

**KEY WORDS:** tensile strength, elongation, contraction (plasticity) of metal materials

### ÚVOD

Slitiny hliníku jsou rozsáhle používaným materiálem jak pro výrobu odlitků, tak pro výrobky, vyráběné tvářením za tepla nebo za studena. Při odlévání i tvářením je důležitá znalost chemických, fyzikálních a mechanických vlastností slitin a to v celém rozsahu teplot jejich technologického zpracování i provozního využívání. Při odlévání jde zejména o průběh objemových změn při tuhnutí a chladnutí odlitků, vznik tepelných, smršťovacích a fázových napětí v odlitcích, porušení celistvosti při vysokých a nižších teplotách - vznik trhlin a prasklin. Tvářením za tepla probíhá v určitém rozmezí zvýšených teplot, ale zpravidla nejsou známy hodnoty termomechanických vlastností veličin, charakterizujících jejich plasticitu v daném teplotním rozmezí.



Obr. 1 : Experimentální zařízení pro měření při zvýšených a vysokých teplotách

V tomto příspěvku předkládáme konkrétní hodnoty pevnostních a plastických vlastností vybraných slévárenských slitin při normálních, zvýšených a vysokých teplotách. Jejich znalost přispívá k prohloubení a rozšíření znalostí o stávajících i nově vyvíjených kovových materiálech.

<sup>1</sup> doc. Ing. Rudolf Kořený, CSc. – Katedra slévárenství, FMMI, VŠB-TU Ostrava

<sup>2</sup> Ing. Petr Lichý, Ph.D. – Katedra slévárenství, FMMI, VŠB-TU Ostrava



## EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

Pro měření pevnostních a plastických vlastností kovových materiálů až do teploty solidu ocelí, litin a slitin neželezných kovů je používáno zařízení od firmy INOVA Praha (obr. 1) s možností měření zatížení do 20 kN, které je doplněno ohřívací pecí vlastní konstrukce s ovládáním ohřevu. Měření je řízeno elektronicky na bázi PC a umožňuje přesné naprogramování ohřevu i zatěžování, měření síly, polohy a deformace. Testovací programy pracují v operačních systémech WINDOWS a EXCEL. Zařízení vyhovuje třídě přesnosti 1 podle mezinárodních norem. Ohřev zkušebních tyčí probíhá ve vertikální elektrické odporové peci s trubkovým grafitovým topným tělesem. Ohřev při experimentu probíhá ve třech etapách: nejprve s rychlostí ohřevu 200°C/min dosáhne teploty přibližně 200°C pod požadovanou teplotou měření, následuje ohřev rychlostí 50 °C/min. na teplotu 30°C pod požadovanou teplotou, v závěrečné fázi se vzorek ohřeje na teplotu měření rychlostí 10°C/min. Pak následuje třímínutová izotermická výdrž, následně je vzorek zatěžován konstantní silou rychlostí 5 mm/min. Na závěr je vzorek ponechán v peci v ochranné atmosféře až do poklesu teploty na cca 200°C, aby se omezila na nejvyšší možnou míru oxidace lomových ploch, určených pro metalografickou a fraktografickou analýzu.

## VÝSLEDKY VLASTNÍCH MĚŘENÍ

Nejrozšířenější slitinou na bázi slitin hliník - křemík je slitina AlSi10MgMn. Jde o podeutektickou slitinu, odlévanou do pískových i kovových forem. Slitina může být použita v litém nebo tepelně zpracovaném stavu. Struktura je tvořena dendrity nebo dendritickými buňkami tuhého roztoku alfa, meziprostory jsou vyplněny eutektikem ( $\alpha + \text{Si}$ ), případně ( $\alpha + \beta$ ), uvažujeme-li omezenou rozpustnost hliníku v křemíku v tuhém stavu. V neovlivněné slitině je eutektický křemík vyloučen ve tvaru destiček, které působí negativně svým vrubovým účinkem na dosahované hodnoty mechanických vlastností. Proto se u slitin podeutektického a eutektického složení v případě pomalého ochlazování odlitku provádí modifikace, kterou se mění morfologie vyloučení částic eutektického křemíku. Vyšší rychlost ochlazování pozitivně působí na makrostrukturu slitin, velikost zrna nebo velikost dendritických buněk. Je možno konstatovat, že při odlévání odlitků ze slitin hliníku je nutno vždy provést odplynění taveniny a uvážit nutnost provedení očkování a modifikace. Právě provedení těchto operací dává předpoklad vysoké vnitřní kvality odlévaných odlitků s vysokými hodnotami mechanických vlastností za normálních, zvýšených a vysokých teplot. Protože odlitky mohou být mechanicky namáhány v celém rozsahu teplot, jsou prováděna systematická měření pevnostních a plastických vlastností až do teploty solidu nebo eutektika.

Jako vysokopevnostní slitina na bázi slitin hliník - křemík se také ve velkém rozsahu používá slitina AlSi7Mg0,3 v tepelně zpracovaném stavu. Hlavním sortimentem jsou odlitky kol osobních automobilů, které se vyrábějí metodou nízkotlakého lití. Právě rozsah používání obou slitin vedl k tomu, že jako jedny z prvních byly proměřovány právě tyto dvě slitiny. K vlastnímu měření byly použity slitiny s chemickým složením, uvedeným v tabulce I. Zkušební tělesa byla odlita v provozních podmínkách slévárny ze vsázky, složené ze 60% houskami příslušné slitiny a ze 40% vlastního vratného materiálu slévárny. Teplota slitiny po vylití z tavicí pece do pánve byla 780 °C, tavenina byla ve všech případech odplyněna na zařízení Foundry Degassing Unit (FDU) argonem po dobu 7,5 minut. Do kovové formy byla odlita zkušební tělíska neovlivněná - 22 ks a dále 22 ks zkušebních těles, ovlivněných očkováním u slitiny AlSi7Mg0,3 předslitinou AlTi5B1 ve formě drátu, u slitiny AlSi10MgMn tabletami MIKROSAL AL T 100. Obě slitiny byly modifikovány tabletami EUTEKTAL T 201. Teploty odlévání byly v rozmezí 750 až 745 °C u slitiny AlSi7Mg0,3 a 745 až 735 °C u slitiny AlSi10MgMn.

Po mechanickém obrábění zkušebních tyčí byla na trhačím stroji prováděna při zvolených teplotách měření pevnostních a plastických vlastností. Účinky očkování a modifikace byly potvrzeny metalografickou analýzou, konkrétní hodnoty naměřených a vyhodnocených veličin jsou v celém rozsahu uvedeny v práci [5]. Jejich grafické znázornění je zachyceno na obr. 2 pro neovlivněnou slitinu AlSi10MgMn, na obr. 3 pro tutéž slitinu ovlivněnou očkováním a modifikací. Na dalších



obrázcích 4 a 5 jsou graficky zobrazeny teplotní závislosti měřených a vyhodnocených veličin pro slitinu AlSi7Mg0,3.

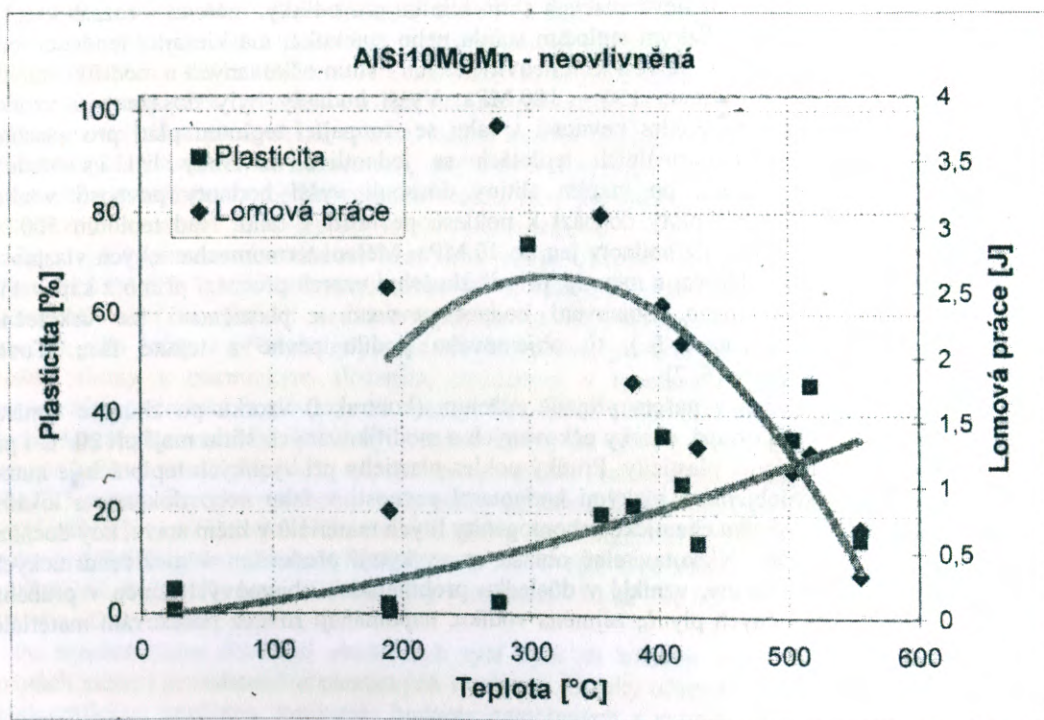
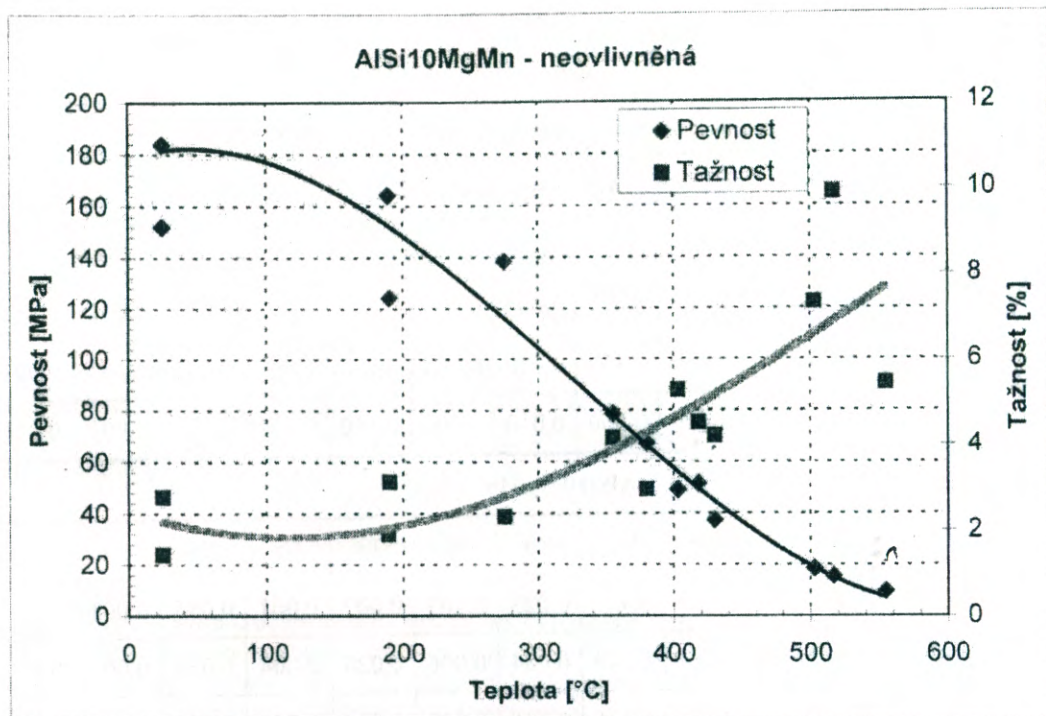
**Tab. I :** Chemické složení zkoumaných slévárenských slitin hliníku.

AlSi7Mg0,3 (%)											
prvek	Si <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub>	Mn	Mg	Cu	Ni	Ti	Cr	Zn	Ca	Pb
housky	7,24	0,129	0,003	0,421	0,003	0,001	0,141	0,001	0,007	0,001	-
neovlivněná	7,06	0,180	0,020	0,350	0,010	0,003	0,150	0,003	0,013	0,001	0,001
ovlivněná	7,23	0,170	0,020	0,350	0,010	0,005	0,160	0,003	0,026	0,001	0,001
AlSi10MgMn (%)											
prvek	Si <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub>	Mn	Mg	Cu	Ni	Ti	Cr	Zn	Ca	Pb
housky	9,87	0,234	0,15	0,439	0,023	0,003	0,007	0,001	0,045	0,001	-
neovlivněná	10,00	0,300	0,17	0,345	0,034	0,006	0,026	0,004	0,039	0,001	0,027
ovlivněná	10,08	0,309	0,18	0,325	0,125	0,012	0,034	0,004	0,078	0,001	0,027

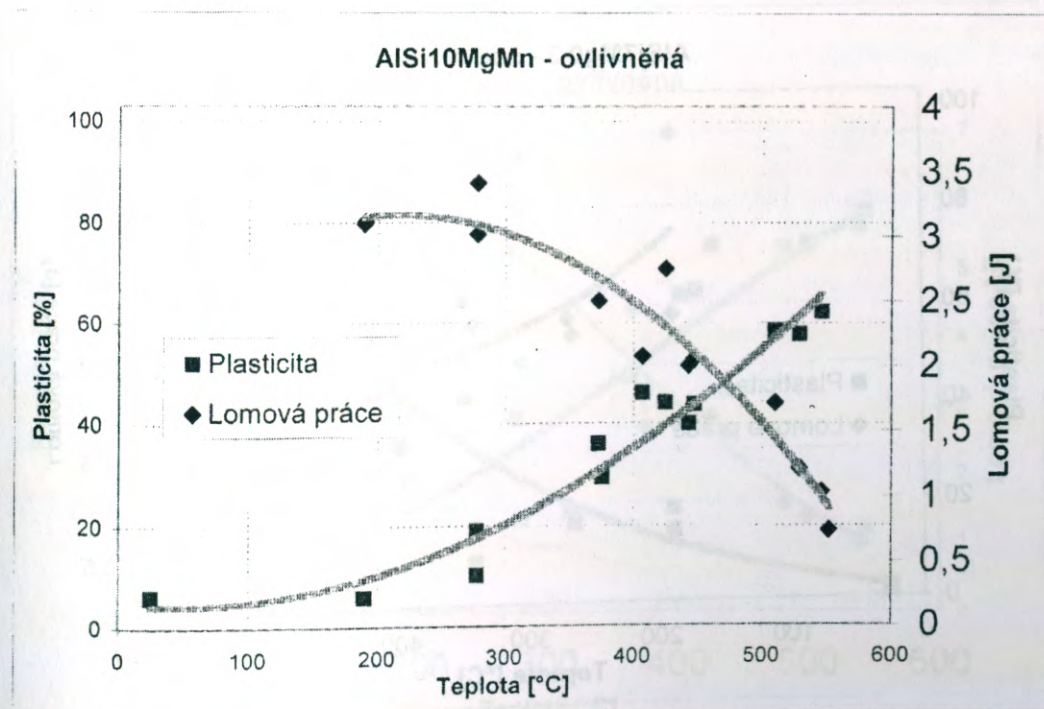
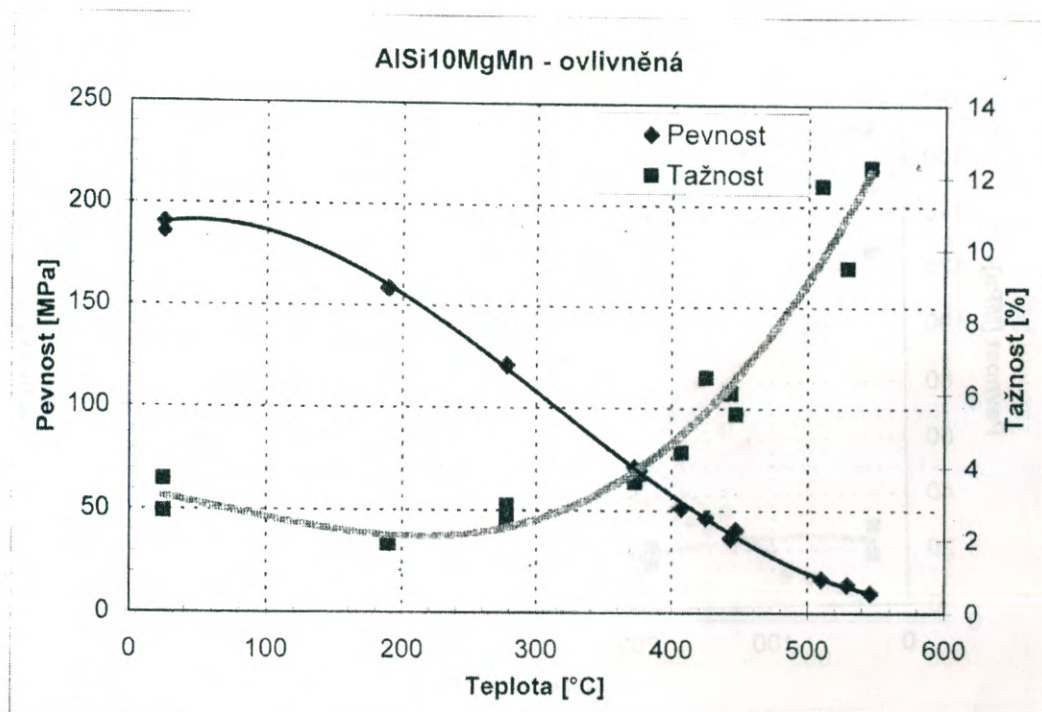
Pevnost v tahu u zkoumaných slévárenských slitin hliníku pro odlitky, měřená v rozsahu teplot od 20 °C až k teplotám, velmi blízkým teplotám solidu nebo eutektika, má klesající tendenci, což se dalo očekávat. Při teplotě 20 °C se ve všech neovlivněných i slitin očkovaných a modifikovaných pevnost v tahu pohybuje v rozmezí 150 – 180 MPa. Vyšší hodnoty byly dosaženy u vzorků očkovaných a modifikovaných. Pokles pevnosti v tahu se stoupající teplotou platí pro všechny kovové materiály. Právě při normálních teplotách se jednotlivé materiály liší i s ohledem na provedené tepelné zpracování, po kterém slitiny dosahují vyšší hodnoty pevnosti v tahu. Při dalším zvyšování zkušební teploty dochází k poklesu pevnosti v tahu. Nad teplotou 500 °C měřená pevnost v tahu dosahuje již hodnoty jen do 10 MPa. Měření termomechanických vlastností ve dvoufázovém pásmu lze aplikovat u metody, při níž zkušební vzorek přechází přímo z kapalného skupenství do skupenství tuhého. Stanovení hodnot pevnosti a plastičnosti lze uskutečnit při rozdílném stupni solidifikace (fs), tj. objemového podílu pevné a tekuté fáze. Touto problematikou se zabývají práce [6, 7].

Plasticita, charakterizována v našem případě zúžením (kontrakcí) vzorku po zkoušce v místě porušení, s rostoucí teplotou stoupá, vzorky očkovaných a modifikovaných slitin mají při 20 °C i při vyšších teplotách vyšší hodnoty plasticity. Prudký pokles plasticity při vysokých teplotách je nutno spojit s existencí mikroobjemů s nízkými hodnotami pevnosti v tahu nebo dokonce s lokální existencí kapalně fáze v důsledku chemické nehomogenity litých materiálů v litém stavu, kdy dochází k dendritickému odměšování. Nízkotavitelné oblasti se vyskytují především v mezidendritických prostorách. Mikroskopické dutiny, vzniklé v důsledku probíhajících objemových změn v průběhu tuhnutí a vyloučení rozpuštěných plynů, zejména vodíku, napomáhají rovněž porušování materiálů v odlitcích.



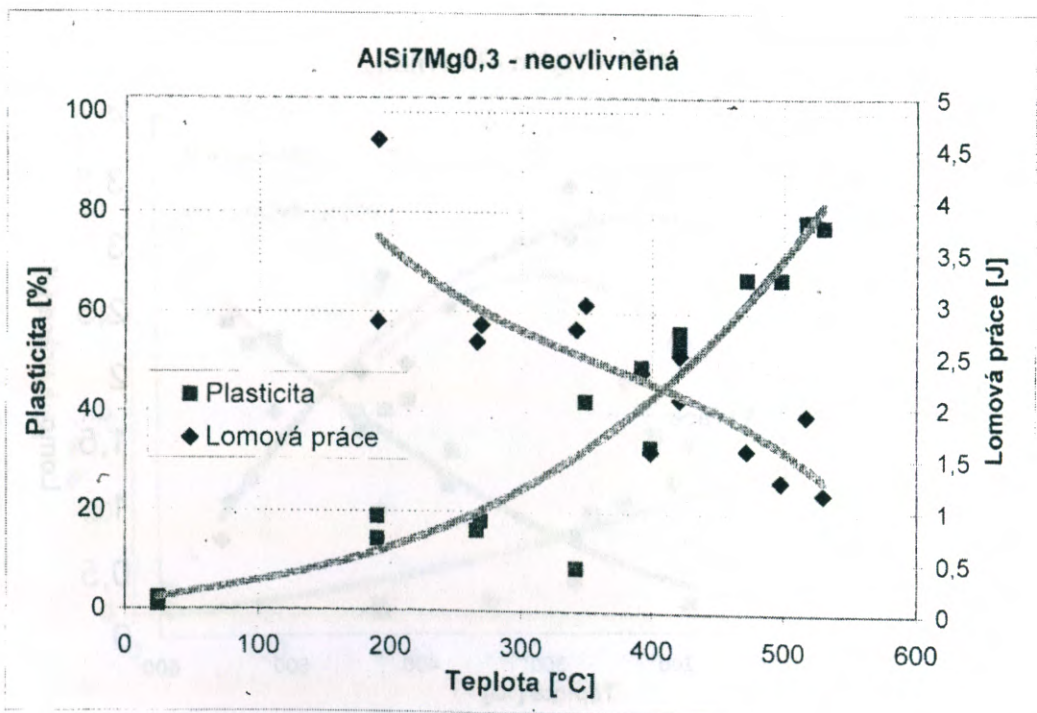
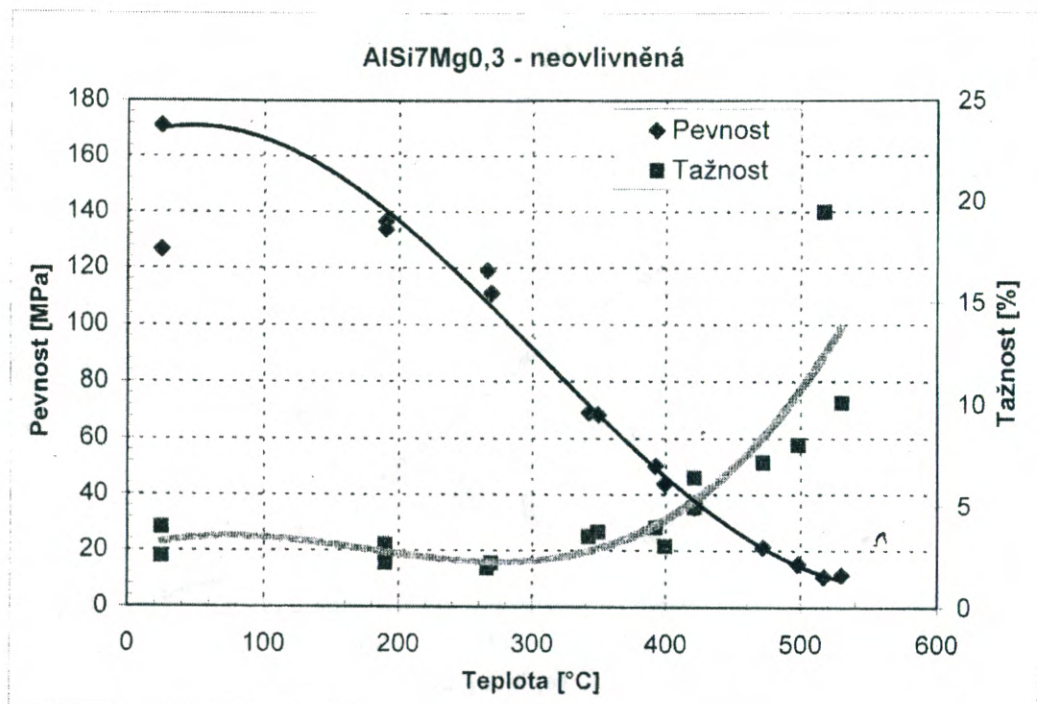


**Obr. 2 :** Teplotní závislost naměřených hodnot mechanických vlastností pro neovlivněnou slitinu AlSi10MgMn [5].

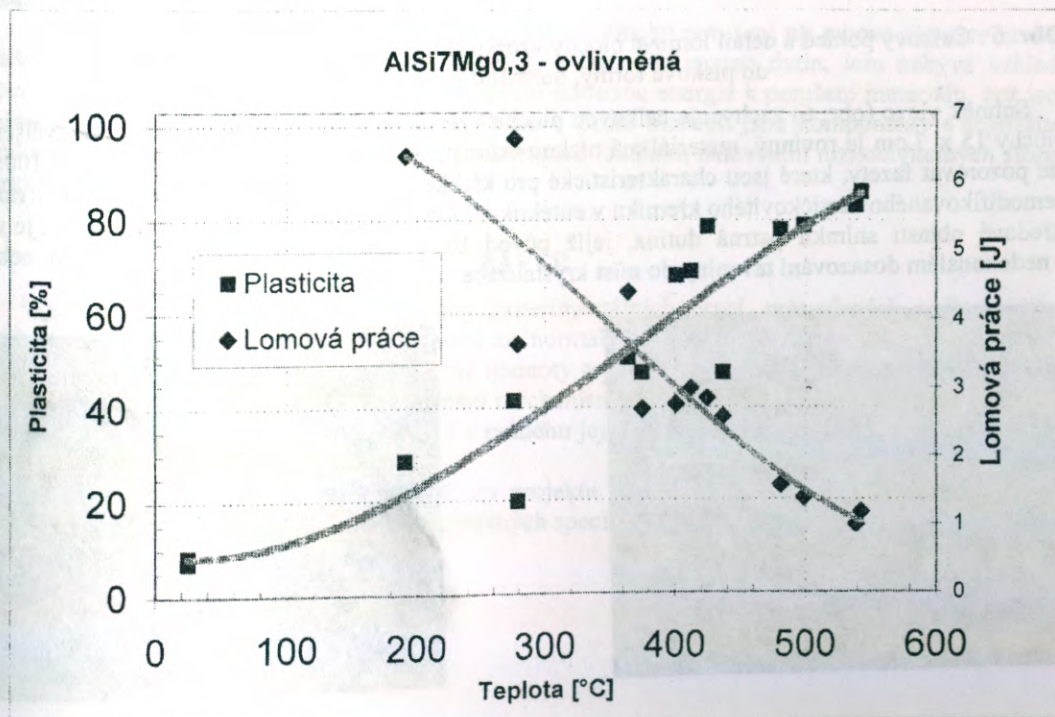
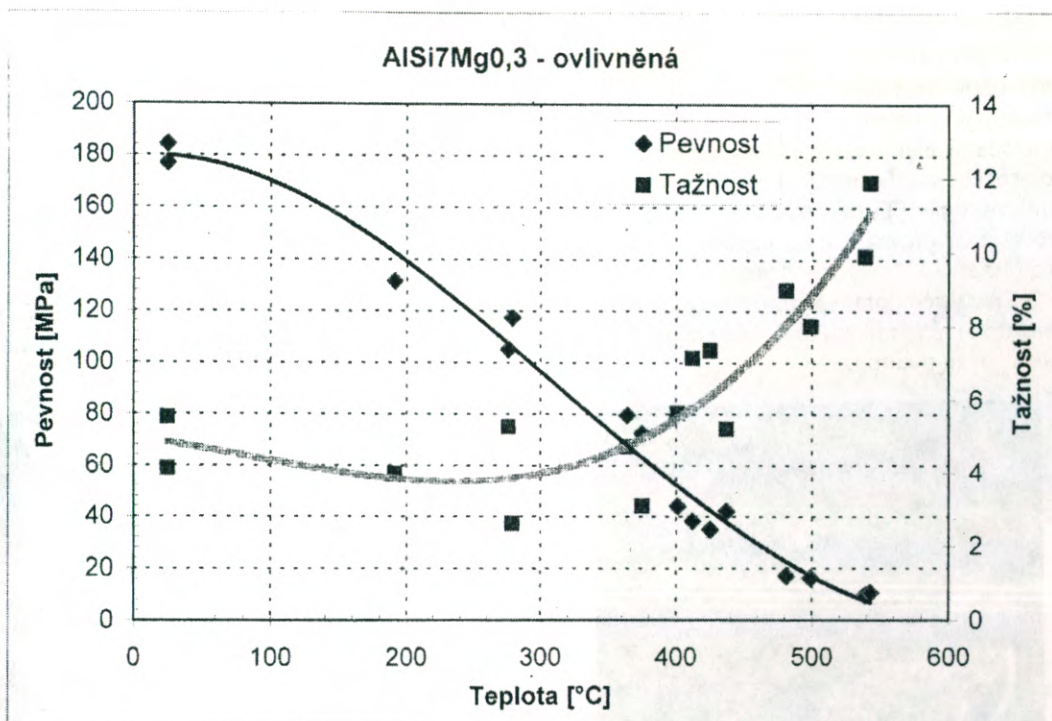


**Obr. 3 :** Teplotní závislost naměřených hodnot mechanických vlastností pro slitinu AlSi10MgMn, ovlivněnou očkováním a modifikací [5].





**Obr. 4 :** Teplotní závislost naměřených hodnot mechanických vlastností pro neovlivněnou slitinu AlSi7Mg0,3 [5].



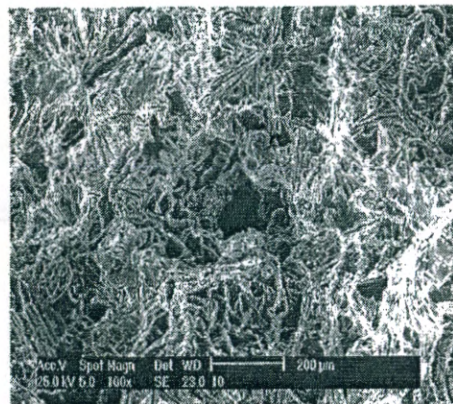
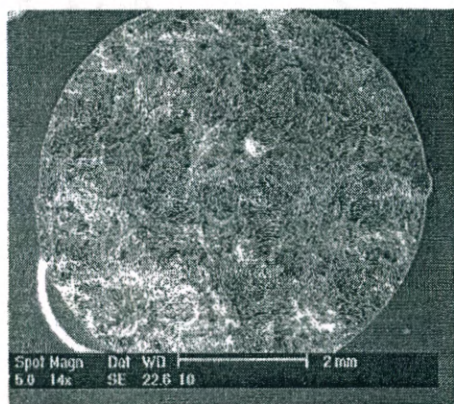
**Obr. 5 :** Teplotní závislost naměřených hodnot mechanických vlastností pro slitinu AlSiMg0,3, ovlivněnou očkovaním a modifikací [5].



## FRAKTOGRAFICKÉ HODNOCENÍ.

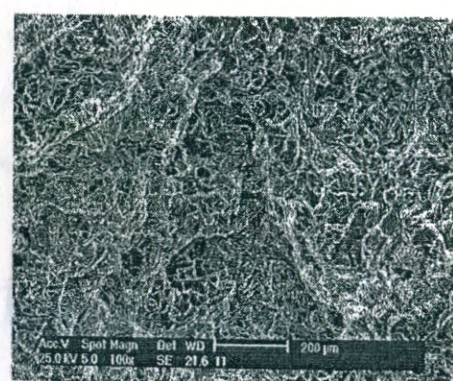
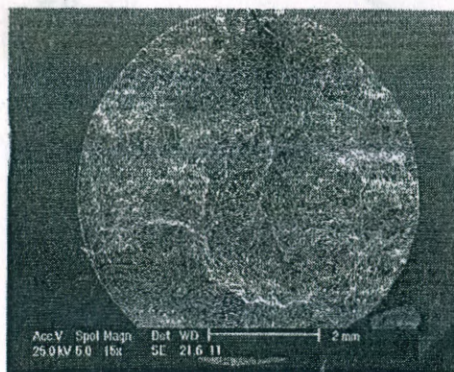
Vnitřní strukturu kovových výrobků lze hodnotit metodami metalografické analýzy na základě vytvoření rovinného výbrusu zkoumané plochy, jejím leptáním vhodnými roztoky a vyfocení celého povrchu při zvolených zvětšeních na optickém mikroskopu. Současné metody studia vnitřní struktury metodami elektronové mikroskopie umožňují studium při značných zvětšeních a to na lomových plochách – mikroskopie na SCAN – mikroskopech, ale také metodami transmisní elektronové mikroskopie (TEM). Současné přístroje jsou schopny provést bodovou, lineární nebo plošnou roentgenovou analýzu koncentrace prvků ve zvoleném místě, na zvolené přímce nebo jejich rozdělení na ploše.

Charakter lomové plochy (plochy porušení souvislosti) lze zachytit pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu. Na dalších obrázcích jsou zachyceny vybrané lomové plochy, získané za uvedených podmínek.



**Obr. 6 :** Celkový pohled a detail lomové plochy vzorku slitiny AlSi10MgMn, nemodifikované, odlité do pískové formy, normální teplota 20 °C [5].

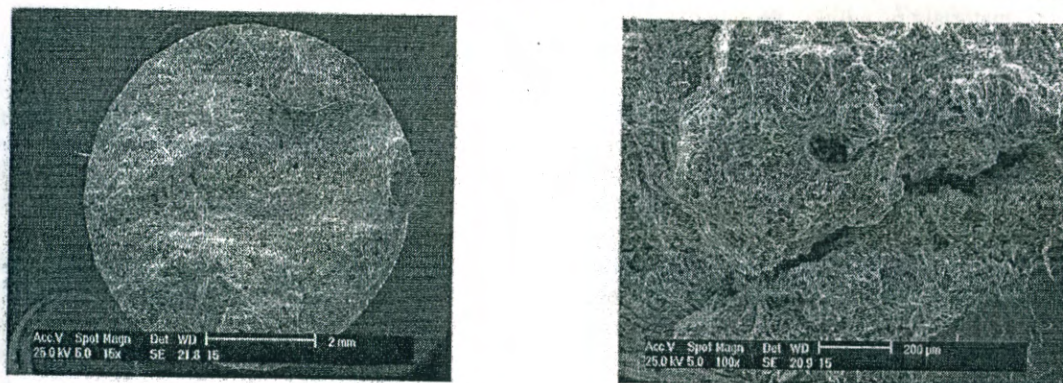
Snímek vlevo (obr. 6) zachycuje celkovou plochu vzorku po provedení tahové zkoušky, zvětšení plochy 15 x. Lom je rovinný, materiál má nízkou tažnost, na snímku vpravo (obr. 6, zvětšení 100x) lze pozorovat fazety, které jsou charakteristické pro křehké štěpné porušení, v tomto případě útvarů nemodifikovaného destičkovitého křemíku v eutektiku. I když bylo provedeno odplynění slitiny, je ve středové oblasti snímku patrná dutina, jejíž původ lze hledat buď v naplynění vodíkem nebo v nedokonalém dosazování taveniny do míst krystalizace.



**Obr. 7 :** Celkový pohled a detail lomové plochy slitiny AlSi10MgMn, neovlivněné, odlité do kovové formy, zkouška tahem provedena při 20 °C [5]



Snímek vlevo (obr. 7) při zvětšení 15x zobrazuje celkový vzhled plochy porušení za uvedených podmínek. Plocha porušení je méně rovinná, na detailním záběru vybraného místa vpravo při zvětšení 100x je zachycen jemný rovnoměrný lom s jemnější strukturou, která je důsledkem vyšší rychlosti ochlazování taveniny v kovové formě. Je patrný menší výskyt dutin.



**Obr. 8 :** Celkový pohled a detail lómové plochy slitiny AlSi10MgMn, ovlivněné očkováním a modifikací, odlité do kovové formy, zkouška tahem provedena při 20 °C [5].

Snímky (obr. 8) zachycují při stejném zvětšení lomovou plochu, na snímku vlevo je patrná jemnější struktura, která je způsobena provedeným očkováním a modifikací, na snímku vpravo je zřetelná trhlina a dutina. Je nutno počítat s tím, že v litých útvarech se budou vyskytovat vždy mikro dutiny v důsledku naplynění slitiny nebo objemových změn, probíhajících při změně skupenství.

Je patrné, že při vyšších teplotách je celkový vzhled plochy porušení při tahové zkoušce hrubší, lom je členitější, plocha ztrácí svou rovinnost. Je vidět větší rozsah dutin, lom nabývá vzhledu dřevitého lomu. Porušení prochází místy s nejmenší potřebou energie k porušení materiálu, což jsou místa s vyloučením nízkotavitelných složek. Právě v těchto místech jsou komponenty s nejnižšími hodnotami pevnosti v tahu nebo dokonce to jsou místa s lokálním natavením nízkotavitelných složek struktury.

## ZÁVĚR

V pojednání jsou prezentovány výsledky experimentálních prací, provedených s cílem získat hodnoty pevnostních a plastických vlastností za normálních, zvýšených a za vysokých teplot až k teplotám solidu zkoumaných slitin. Získané hodnoty a jejich teplotní závislosti v celém teplotním intervalu mají sloužit k dokonalejšímu poznání mechanismu vzniku porušení materiálu při vysokých teplotách při jejich odlévání – vznik trhlin a v průběhu jejich technologického zpracování při tváření za tepla.

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory projektu VZ MSM 6198910013 „Procesy přípravy a vlastností vysoce čistých a strukturně definovaných speciálních materiálů“.

## LITERATURA:

- [1] KOZELSKÝ, P., SZROMEK, P., HAVLÍČEK, F. : Termofyzikální vlastnosti oceli při tuhnutí a chladnutí, Hutnické listy LIV, 1999, s.105 - 108.
- [2] HAVLÍČEK, F. a kol. : Teplotní podmínky elasticko – plastických porušení souvislosti materiálů na odlitky, Projekt GA ČR, r. č. 106/99/1537, Ostrava 2002.
- [3] KOZELSKÝ, P., HAVLÍČEK, F. : Pevnostní a termofyzikální vlastnosti ocelí v oblasti teplot solidu, Hutnické listy, 1995, č. 7/8, s. 51 – 53.
- [4] HAVLÍČEK, F., KOZELSKÝ, P. : Termofyzikální a pevnostní vlastnosti ocelí v oblasti teplot solidu, In „Nové poznatky ve výzkumu plynulého odlévání ocelí“, VŠB – TU Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, GA – ČR, Ostrava 2001.
- [5] NOVÁK, J. : Termomechanické, elasticko – plastické a vybrané fyzikální vlastnosti slévárenských slitin hliníku při zvýšených a vysokých teplotách, Diplomová práce, Katedra slévárenství, VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2002.
- [6] OHM, L., ENGLER, S. : Festigkeitseigenschaften erstarrenden Randschalen aus Aluminiumlegierungen – Teil 1, Giessereiforschung 42, 1990, Nr. 3, s. 131 – 147, Nr. 4, s. 149 – 162.
- [7] FREYN, M. : Mechanické vlastnosti slitin hliníku v intervalu tuhnutí – vznik trhlin. Disertační práce, Katedra slévárenství, VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava 1996.